

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190473

# 计及锅炉动态的直流受端系统中长期频率响应计算方法

颜自坚<sup>1</sup>, 刘俊<sup>1</sup>, 周海强<sup>2</sup>, 李峰<sup>1</sup>, 熊月清<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院南京分院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 直流故障后系统动态过程持续时间较长, 计算中长期频率响应需要计及锅炉的动态。首先推导了直流受端系统的低阶频率响应模型, 简要介绍了火力发电厂锅炉及机炉协调控制系统的工作原理。其次, 提出采用非机理建模方法建立描述发电机机械功率-频率特性的传递函数模型。进行负荷扰动试验, 量测并记录系统频率及发电机机械功率偏差量。在此基础上, 应用功率谱及最小二乘法辨识模型参数, 对负荷扰动试验时的扰动信号、样本选取等进行了讨论。最后, 将该方法应用于含直流落点的 IEEE3 机 9 节点系统, 计算了直流闭锁后受端系统的中长期频率响应, 验证了基于辨识模型计算方法的有效性。

**关键词:** 频率响应模型; 锅炉动态; 协调控制系统; 功率谱方法; 参数辨识

## Mid-term and long-term frequency calculation method for the HVDC receiving-end system considering the boiler dynamics

YAN Zijian<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, ZHOU Haiqiang<sup>2</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, XIONG Yueqing<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute (Nanjing Branch), Nanjing 210098, China;

2. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The dynamic process of power system after DC blocking will last for a long time. The boiler dynamics should be taken into consideration when calculating the system frequency response. Firstly, the low order frequency response model of the DC receiving-end system is derived. The boiler and the coordinated control system of the thermal power plant are introduced briefly. Then, the non-mechanism modeling method is adopted to establish the transfer function model which describes the mechanical power-frequency characteristics of the generator. The load disturbance test is carried out and the frequency and mechanical power deviations of the generator are measured. The power spectrum and the least square methods are applied to identify parameters of the transfer function model. The selection of load disturbance signal and samples is discussed. Finally, the proposed method is applied in the IEEE 3-generator 9-bus system with a DC feed line. The long-term frequency response of the receiving-end system after DC blocking is calculated. The results validate the effectiveness of the identified model considering boiler dynamics.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51837004) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Application of Large-scale Pre-dispatch Key Technologies" (No. SGZJ0000KXJS1800285).

**Key words:** frequency response model; boiler dynamics; coordinated control system; power spectrum method; parameter identification

## 0 引言

随着“西电东送”工程的建设, 我国特高压直

流输电规模不断增长, 直流受端系统已成为现代电力系统的重要组成部分。直流受端系统具有外部电源占比高、换流站响应速度快且需要消耗大量无功等特点, 其频率及电压稳定性问题较为突出<sup>[1-2]</sup>, 快速、准确地计算直流闭锁后系统的频率响应对于直流受端系统的稳定与控制具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

现有电力系统频率响应计算方法主要分为两

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51837004); 国家电网公司科技项目资助“大电网预调度关键技术研究与应用”(SGZJ0000KXJS1800285)

类, 即数值法和基于频率响应模型的方法。数值法通过积分运算求取系统的微分代数方程模型, 获取频率响应, 它需要系统的详细模型和参数, 且对于大型电力系统而言计算量很大。为了简化计算, 人们对基于频率响应模型的计算方法进行了研究。文献[5]将调速器近似为一个延迟函数, 将汽轮机简化为一个标准函数, 提出了一种计算系统平均频率(Average System Frequency, ASF)的简化方法。在此基础上, 文献[6]提出了多机电力系统的低阶频率响应(System Frequency Response, SFR)模型, 将多机系统聚合为连接在同一母线上的单台等值发电机及负荷, 求出等值参数, 据此计算系统惯量中心的频率。文献[7]考虑了系统频率的分布性, 保留网络结构, 提出了一种基于直流潮流的频率响应模型, 提高了频率计算的精度。文献[8]扩充了传统的频率响应模型, 考虑水轮机组、可再生能源机组的一次调频特性以及负荷的频率响应特性, 建立了可在线更新的直流受端系统频率响应模型。与数值方法相比, 基于频率响应模型的方法计算速度更快, 但其精度取决于模型的准确性, 现有模型一般忽略了锅炉的动态, 假设蒸汽压力保持不变, 只考虑调速器及汽轮机的作用, 因此其适用范围受到一定限制。

直流故障对受端交流系统的冲击较大, 换流站闭锁后的动态过程持续几十秒甚至几分钟, 由于蓄热器的容量有限, 锅炉蒸汽压力将发生变化, 其控制系统也将动作, 此时, 使用现有模型计算中长期频率响应将导致较大误差。文献[1]的研究表明, 根据现有模型计算得到的直流受端系统频率响应曲线与实际量测数据之间存在较大偏差, 而且计算结果往往偏乐观, 采用这一结果将无法预见实际运行中可能出现的低频减载动作。文献[9]指出当系统遭受的有功扰动较大时, 若不计发电厂锅炉、辅机及机组控制系统的影响, 计算所得的系统最低频率及稳态频率与实际值相差较大。

为此, 本文提出了一种计及锅炉动态的直流受端系统中长期频率响应计算方法。为提高直流受端系统低阶频率响应模型的精度, 在计及锅炉动态的条件下, 分析了汽轮发电机机械功率随频率变化的动态特性, 建立其传递函数模型, 提出了基于负荷扰动试验的频域参数辨识方法。最后, 以含直流落点的 IEEE3 机 9 节点系统为例验证了所提方法的有效性。

## 1 直流受端系统低阶频率响应模型

一般来说, 直流受端系统内部电气连接较为紧密, 各母线的频率差异和网络的影响可以忽略不计,

在计算频率响应时, 可以系统惯量中心的频率来代表全系统的频率, 并假设所有发电机及负荷连接在同一条母线上。

设系统有  $ng$  台发电机, 第  $i$  台发电机惯性时间常数为  $M_i$ , 角速度为  $\omega_i$ , 机械功率为  $P_{m,i}$ , 电磁功率为  $P_{e,i}$ , 阻尼系数为  $D_i$ ,  $i=1, 2, \dots, ng$ 。定义惯量中心角速度  $\omega_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^{ng} M_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{ng} M_i}$ , 则可以推出系统惯量中心的摇摆方程为

$$M_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_{COI}}{dt} = \sum_{i=1}^{ng} P_{m,i} - \sum_{i=1}^{ng} P_{e,i} - D_{\Sigma} \cdot \omega_{COI} \quad (1)$$

式中,  $M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{ng} M_i$ ,  $D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{ng} D_i$ 。在不计网损的条件下,  $\sum_{i=1}^{ng} P_{e,i} = \sum_{i=1}^{nl} P_{l,i}$ ,  $nl$  为负荷数量。将方程(1)转化为  $\Delta\omega_{COI}$  的运动方程, 可得

$$M_{\Sigma} \cdot \frac{d\Delta\omega_{COI}}{dt} = \sum_{i=1}^{ng} \Delta P_{m,i} - \sum_{i=1}^{nl} \Delta P_{l,i} - D_{\Sigma} \cdot \Delta\omega_{COI} \quad (2)$$

为简便起见, 以下将发电机机械功率随频率变化的特性简称为功-频特性。设发电机功-频特性为  $\Delta P_{m,i}(s) = G_{g,i}(s) \cdot \Delta\omega(s)$ , 负荷频率特性为  $\Delta P_{l,j}(s) = G_{l,j}(s) \cdot \Delta\omega(s)$ , 则直流受端系统频率响应原理图如图 1 所示。

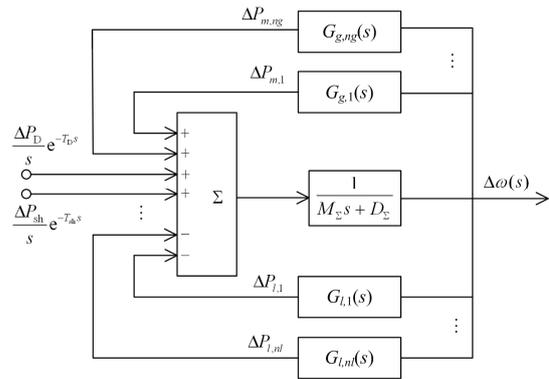


图 1 直流受端系统频率响应原理图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency response of the HVDC receiving-end system

图 1 中输入量  $\Delta P_D e^{-T_D s} / s$  对应着故障后  $T_D$  时刻直流功率紧急提升  $\Delta P_D$ , 输入量  $\Delta P_{sh} e^{-T_{sh} s} / s$  则对应着故障后  $T_{sh}$  时刻切除负荷  $\Delta P_{sh}$ 。由图 1 可推出

$$\Delta\omega(s) = \frac{\Delta P_D e^{-T_D s} + \Delta P_{sh} e^{-T_{sh} s}}{M_{\Sigma} s^2 + D_{\Sigma} s - s \sum_{i=1}^{ng} G_{g,i}(s) + s \sum_{i=1}^{nl} G_{l,i}(s)} = G(s) \cdot (\Delta P_D e^{-T_D s} + \Delta P_{sh} e^{-T_{sh} s}) \quad (3)$$

式中,  $G(s) = \left( M_{\Sigma} s^2 + D_{\Sigma} s - s \sum_{i=1}^{ng} G_{g,i}(s) + s \sum_{i=1}^{nl} G_{l,i}(s) \right)^{-1}$ ,

设  $h(t) = L^{-1}(G(s))$ , 则可求得

$$\Delta\omega(t) = \Delta P_D \cdot h(t - T_D) + \Delta P_{sh} \cdot h(t - T_{sh}) \quad (4)$$

由此可以求出  $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$ 。由式(3)可见, 发电机功-频特性及负荷的频率特性对系统频率响应有很大的影响, 为突出研究前者, 本文假设负荷为恒定负荷, 即  $G_{l,i}(s) = 0$ , 而重点研究  $G_{g,i}(s)$  对计算结果的影响。

## 2 计及锅炉动态的汽轮发电机功-频特性

发电机功-频特性  $G_{g,i}(s)$  与发电厂动力系统的组成密切相关, 由于本文主要研究锅炉动态对  $G_{g,i}(s)$  的影响, 故以火电厂为研究对象。现代火电厂动力系统由锅炉、汽轮机、调速器及机炉协调控制系统(Coordinated Control System, CCS)四个部分组成, 它们的连接关系如图 2 所示。

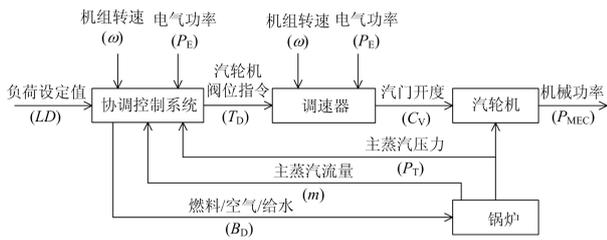


图 2 火电厂动力系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal power plant power system

由图 2 可以看到, 在负荷设定值 LD 给定的条件下, 输出机械功率  $P_m$  随着机组转速  $\omega = 2\pi f$  而变化, 其中  $f$  为发电机频率,  $P_m$  与  $f$  之间的映射关系即为发电机功-频特性。在暂态计算时, 一般认为锅炉的主蒸汽流量  $m$  及主蒸汽压力  $P_T$  保持不变, 仅考虑调速器及汽轮机的动态, 此时功-频特性即为发电机一次调频特性。

### 2.1 汽轮机及调速器

文献[10-11]给出了汽轮机及其调速器的数学模型及各种参数的典型取值。文献[12]分析了调速器参数对发电机调频能力和电网频率稳定性的影响, 文献[13]提出了一种原动机及调速器的响应特性模型, 并通过转速阶跃试验辨识了模型的参数。

对于汽轮发电机, 其功-频特性可表示为

$$G_{g,i}(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1 + sT_G} \cdot \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (5)$$

式中:  $R$  为调差系数;  $T_G$  为调速器时间常数;  $T_{CH}$  为主进汽容积效应时间常数;  $T_{RH}$  为再热器时间常

数;  $F_{HP}$  为高压汽缸机械功率比例系数。式(5)所示模型没有考虑锅炉及 CCS 的动态, 在进行中长期频率响应计算时会导致较大误差, 因此, 有必要考虑锅炉的热力学过程, 建立适应中长期频率计算需要的发电机功-频特性模型。

### 2.2 锅炉及机炉协调控制系统

锅炉包括磨煤机、燃烧室、水冷壁和汽包等机构, 其输入信号为燃料、空气及进水量, 输出量为主蒸汽压力, 进入汽轮机的蒸汽量与主蒸汽压力和调速器控制的汽门开度成正比。锅炉是一个复杂的多变量非线性时变系统, 其动态模型详见文献[14-17], 限于篇幅, 此处不再赘述。

CCS 系统在现代火电厂得到了广泛应用, CCS 由传统的机、炉分布控制系统发展而来, 它根据发电机电磁功率  $P_E$ 、转速  $\omega$ 、机组功率指令(来自 AGC 或手工设定)以及主蒸汽压力  $P_T$  协调控制汽轮机和锅炉的动作。CCS 包括单元主控、汽机主控和锅炉主控 3 个部分, 其中, 汽机主控部分生成汽轮机阀门开度控制信号, 以控制机组的输出功率; 锅炉主控部分形成锅炉的燃料、给水和风量指令, 以保证主蒸汽参数的稳定。根据锅炉和汽机主控部分输入、输出信号的不同, CCS 有多种不同的调节方式, 其中锅炉跟随汽轮机的调节方式或以锅炉跟随为基础的协调控制方式[18-19]较为常用。

### 2.3 汽轮发电机功-频特性模型

由上述可知, 在考虑锅炉动态时, 如果采用机理分析的方法建立发电机功-频特性模型不仅需要掌握汽轮机、调速器及锅炉的详细参数, 还需要了解 CCS 的控制方式及各环节参数, 这在实践中往往非常困难。

为此, 考虑采用非机理建模的方法, 不去关心火电厂动力系统详细的物理结构和工作机理。将图 2 所示的发电厂动力系统视作“黑盒子”, 其输入输出信号分别为发电机频率  $f$  及机械功率  $P_m$ , 设描述功-频特性的传递函数  $G_i(s)$  具有以下形式:

$$G_{g,i}(s) = \frac{\Delta P_{m,i}(s)}{\Delta f(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n} \quad (6)$$

式中, 系数向量  $\theta = [a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$  为待定参数,  $n$ 、 $m$  为分母、分子阶数, 其取值可通过数值试验来确定。计算表明, 一般情况下  $n = 7$ ,  $m = 6$  时即可获得较好的精度。

## 3 发电机功-频特性传递函数参数辨识

设直流受端系统结构如图 3 所示, 任选一负荷节点施加持续的负荷扰动  $\Delta P_l(t)$ , 测量并记录系统频率波动信号  $\Delta f(t)$  及各发电机机械功率变化量

$\Delta P_{m,i}(t)$ , 根据试验测得的数据, 应用加权交叠平均法 (又称为 Welch 方法) 计算  $\Delta f(t)$  与  $\Delta P_{m,i}(t)$  的互功率谱密度函数  $S_{xy}(f)$  以及  $\Delta f(t)$  的自功率谱密度函数  $S_{xx}(f)$ , 据此求出实测的系统频域响应函数  $\bar{G}_{g,i}(f) = S_{xy}(f)/S_{xx}(f)$  [20]。对于设定的参数  $\theta$ , 将  $s = j \cdot 2\pi f$  代入式(6)可计算出对应的频率响应函数  $G_{g,i}(f)$ , 因此, 发电机功-频特性模型的参数辨识问题即寻找使  $G_{g,i}(f) - \bar{G}_{g,i}(f)$  最小的  $\theta_{opt}$ 。

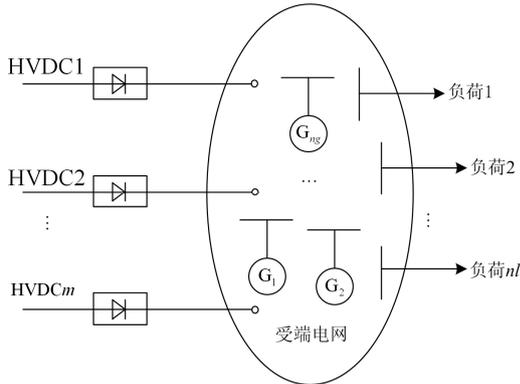


图 3 直流受端系统结构图

Fig. 3 Structure of the HVDC receiving-end system

负荷扰动试验时, 输入信号应具有足够的宽度。最为理想的扰动信号是白噪声, 但实践中生成白噪声存在一定的困难。试验发现, 常见的阶跃信号由于频带较窄, 无法激发电厂动力系统在整个频带内的动态特性, 故无法获得较为准确的  $\bar{G}_{g,i}(f)$ 。在试验中, 可以用 3~4 个正弦波叠加构成的组合信号作为负荷扰动信号, 正弦波的频率在系统截止频率范围内大致均匀分布。计算表明, 与阶跃信号相比, 组合扰动信号可以有效地提高辨识精度。

发电厂动力系统具有低通特性, 其截止频率一般小于 10 Hz, 故可取采样频率  $f_s = 20$  Hz, 采样间隔  $T_s = 0.05$  s。设取样点个数  $N = 1024$ , 应用 Welch 方法计算频率响应函数, 设在频率  $f_k = f_s(k-1)/N$  处  $\bar{G}_{g,i}(f_k) = R_k + jI_k$ ,  $R_k$ 、 $I_k$  分别为  $\bar{G}_{g,i}(f_k)$  的实部与虚部,  $k = 1, 2, \dots, N$ ; 记

$$\eta = -[R_1 \ I_1 \ R_2 \ I_2 \ \dots \ R_N \ I_N]^T$$

并定义  $(2N) \times (n+m+1)$  阶的矩阵  $\Psi$  :

$$\Psi = [A_1 \ B_1; A_2 \ B_2; \dots; A_N \ B_N]$$

其中,  $A_k$  和  $B_k$  分别为  $2 \times n$ 、 $2 \times (m+1)$  的子矩阵,  $k = 1, 2, \dots, N$ , 其表达式为

$$A_k = \begin{bmatrix} -I_k \omega_k & -R_k \omega_k^2 & I_k \omega_k^3 & R_k \omega_k^4 & -I_k \omega_k^5 & -R_k \omega_k^6 & I_k \omega_k^7 & \dots \\ R_k \omega_k & -I_k \omega_k^2 & -R_k \omega_k^3 & I_k \omega_k^4 & R_k \omega_k^5 & -I_k \omega_k^6 & -R_k \omega_k^7 & \dots \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \omega_k^2 & 0 & -\omega_k^4 & 0 & \omega_k^6 & \dots \\ 0 & -\omega_k & 0 & \omega_k^3 & 0 & -\omega_k^5 & 0 & \dots \end{bmatrix},$$

$$\omega_k = 2\pi f_k。$$

应用高斯最小二乘法, 可推出使  $G_{g,i}(f)$  与  $\bar{G}_{g,i}(f)$  拟合误差最小的系数为

$$\theta_{opt} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \eta \quad (7)$$

将  $\theta_{opt}$  代入式(6)即得描述第  $i$  台发电机功-频特性的传递函数  $G_{g,i}(s)$ , 将  $G_{g,i}(s)$  代入式(3)即可计算出系统的频率响应。

需要说明的是,  $G_{g,i}(f)$  具有低通特性, 在低频段变化较大, 而频率较大时将趋近于零。如果直接对所有  $N$  个频率点进行拟合, 既会加大计算量, 还可能由于矩阵  $\Psi$  的条件数过大造成收敛困难。实践中可挑选若干个具有代表性的频率点, 其中, 在频率响应变化较大的低频段密集取点, 而在频率较大时, 仅取少量代表点, 这样既可减小计算量, 又可提高算法的稳定性。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

为了验证上述频率响应计算方法的有效性, 对含直流落点的 IEEE3 机 9 节点系统进行了参数辨识和频率计算。算例系统结构如图 4 所示。设发电机 G1、G2、G3 均为汽轮发电机, 远方发电机 GR 通过 HVDC 线路向系统传输功率  $P_d = 40$  MW, 形成直流受端系统。系统总负荷为 360 MW, 其中直流输电功率占比为 11.1%, 取基准容量  $S_{base} = 100$  MVA。系统网络参数及各发电机惯性时间常数、阻尼系数、暂态电抗等均取 IEEE3 机 9 节点系统标准数据, 详见文献[10]。

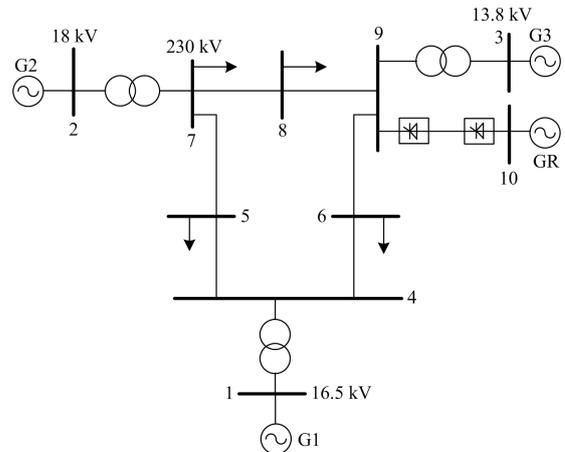


图 4 算例系统结构图

Fig. 4 Structure of example system

本文使用中国电科院推出的电力系统全过程动态(Full Dynamic Simulation program, FDS)仿真软件<sup>[21]</sup>进行数值仿真, 其中, 汽轮机及调速器的模型参数如表 1 所示, 锅炉及机炉协调控制系统参数取 FDS 软件给出的典型值。为简化分析, 设 3 台发电机采用相同的锅炉及 CCS 系统, 并以发电机 G2 为例进行参数辨识。

表 1 发电机汽轮机与调速器模型参数

Table 1 Parameters of turbine and speed regulator of generator

$R$	$T_{RH}/s$	$F_{HP}$	$T_{CH}/s$	$T_G/s$
0.05	10	0.333	0.2	0.02

#### 4.2 负荷扰动试验与参数辨识

为了建立计及锅炉动态的汽轮发电机功-频特性模型, 进行了负荷扰动试验。在负荷节点 8 施加组合扰动信号, 该扰动由频率分别为 0.5 Hz、1.7 Hz、2.8 Hz, 幅值为 10 MW 的 3 种正弦信号叠加而成, 扰动持续时间为 [0, 50] s。应用 FDS 软件进行了全过程动态仿真, 得出系统频率偏差  $\Delta f(t)$  及发电机机械功率偏差  $\Delta P_{m,i}(t)$  变化曲线如图 5 所示。

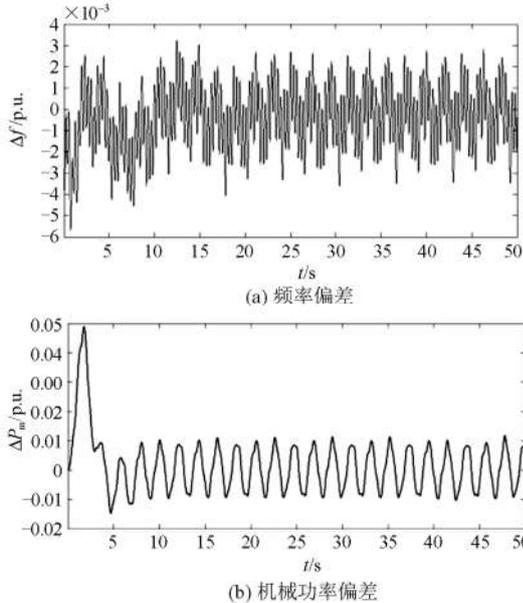


图 5 负荷扰动时的频率及机械功率偏差曲线

Fig. 5 Frequency deviation and mechanical power deviation curves under load disturbances

应用改进 Welch 加窗法求出  $\Delta f(t)$  的自功率谱函数  $S_{xx}(f)$  以及  $\Delta f(t)$  与  $\Delta P_{m,i}(t)$  的互功率谱密度函数  $S_{xy}(f)$ , 并求出  $|\bar{G}_{g,i}(f)| = |S_{xy}(f)/S_{xx}(f)|$  如图 6 所示。由图 6 可见, 当频率大于 3 Hz 时,  $|\bar{G}_{g,i}(f)|$  几乎为零, 因此, 在选取频率点进行拟合时, 可在 [0, 3] Hz 密集取样, 共 30 个取样点, 根据式(7)求出

$\theta_{opt}$ , 得出计及锅炉动态的功-频特性传递函数为

$$G_{g,i}(s) = \frac{-110.3 \times (1 + 115s + 6653s^2 + 24479s^3 + 1093s^4 + 1103s^5 - 61s^6)}{1 + 156.5s + 7887.3s^2 + 59014s^3 + 43120s^4 + 6207.7s^5 + 1883.1s^6 + 70.4s^7}$$

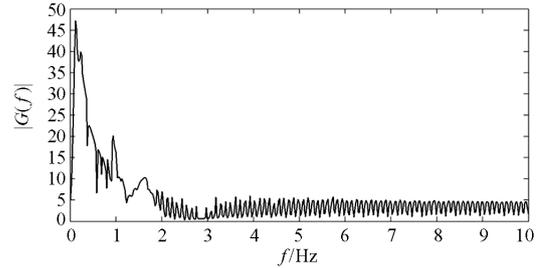


图 6 由试验数据计算出的频域响应函数

Fig. 6 Frequency response function calculated with measured data

图 7 给出  $|G_{g,i}(f)|$  拟合  $|\bar{G}_{g,i}(f)|$  的效果图。

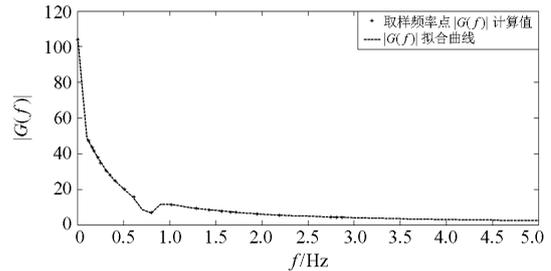


图 7 频域响应函数的拟合曲线

Fig. 7 Fitted curve of the frequency response function

#### 4.3 HVDC 换流站发生双极闭锁故障的频率响应计算分析

为了验证  $G_{g,i}(s)$  的准确性, 根据辨识结果及式 (3)所示的频率响应模型对直流闭锁后的频率进行了计算。设  $t=0$  s 时, HVDC 换流站发生双极闭锁故障, 应用 FDS 软件计算了故障后 100 s 的频率响应, 以此作为实际响应曲线。将仅考虑汽轮机及调速器动态时的模型称为经典模型, 将计及锅炉动态的功-频特性模型称为辨识模型, 使用不同模型计算所得的频率响应曲线如图 8 所示。

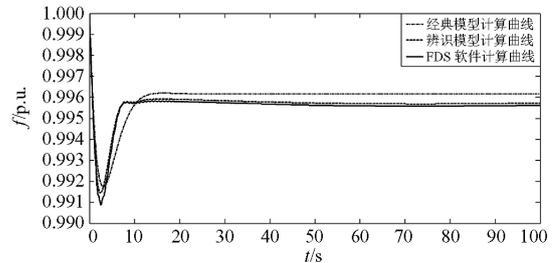


图 8 采用不同模型计算得到的频率响应曲线对比  
Fig. 8 Comparisons of frequency curves calculated with different models

由图 8 可见,采用经典模型求出的频率曲线与系统实际频率曲线存在较大偏差。特别是在故障后数秒的暂态时段内,实际频率响应跌落速度更快,跌落幅值也更大,如按经典模型计算值进行控制则有可能导致意外的低频减载(UFLS)动作。在准稳态或稳态时段内,实际频率比经典模型计算值低约 0.000 5 p.u.(0.025 Hz),而基于辨识模型的计算结果与系统实际响应基本一致,较为准确地反映了故障后系统的频率响应特性,这也说明了开展发电机功-频特性参数辨识工作的必要性<sup>[22]</sup>。

## 5 结论

本文针对传统中长期频率计算忽略锅炉动态、计算误差偏大的问题,提出通过负荷扰动试验辨识发电机功-频特性的传递函数,再通过低频频率响应模型计算直流受端系统频率的方法。以实测的发电机频率及机械功率偏差量作为输入、输出信号,采用功率谱和最小二乘法拟合功-频特性传递函数模型的参数。仿真表明,采用辨识模型可以有效地提高中长期频率计算精度。该方法既考虑了锅炉动态,又避免了机理建模方法所面临的系统结构复杂、参数众多、难以一一辨识的困难。

需要指出,传递函数本质上是一种线性化方法,而火电厂动力系统具有强非线性,因此辨识得出的功-频特性模型仅在特定运行方式下有效<sup>[23-24]</sup>。如何提高频率响应模型的适应性和计算精度将是下一步研究的重点,一种可能的方法是预先建立若干典型方式下的频率响应模型,在线时根据实际工况调用最为合适的模型,以提高分析精度。

## 参考文献

- [1] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.  
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of Jin-Su DC Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [2] 方勇杰. 用紧急控制降低由输电断面开断引发系统崩溃的风险: 对印度大停电事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 1-6.  
FANG Yongjie. Application of emergency control to reduce risk of system collapse triggered by power transmission interface tripping: thinking on the India power blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 1-6.
- [3] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.  
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.
- [4] 李碧君, 李兆伟, 吴雪莲, 等. 基于能量变化的暂态频率安全紧急控制决策方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 150-157.  
LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Research on the decision method of frequency security emergency control based on energy change[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 150-157.
- [5] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [6] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [7] LI C, LIU Y, ZHANG H. Fast analysis of active power-frequency dynamics considering network influence[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-6.
- [8] 王路平, 谢小荣, 刘颖, 等. 多直流馈入受端电网短期频率稳定性的实时协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 36(8): 2205-2212.  
WANG Luping, XIE Xiaorong, LIU Ying, et al. Real-time coordinated control of short-term frequency stability for the receiving-end systems with multi-infeed HVDC transmissions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 36(8): 2205-2212.
- [9] 刘克天, 王晓茹. 电厂锅炉及辅机对电力系统动态频率影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 53-58.  
LIU Ketian, WANG Xiaoru. Simulation study of influences of power plant's boiler and auxiliaries on power system dynamic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 53-58.
- [10] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [12] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-95.

- JIN Na, LIU Wenying, CAO Yinli, et al. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95.
- [13] 武诚, 徐政, 倪秋龙, 等. 基于响应特性的原动机及调速器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 226-231.
- WU Cheng, XU Zheng, NI Qiulong, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 226-231.
- [14] DE MELLO F P. Boiler models for system performance studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 66-74.
- [15] IEEE Working Group on "Power Plant Response to Load Changes". MW response of fossil fueled steam units[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(2): 455-463.
- [16] 曾德良, 赵征, 陈彦桥, 等. 500 MW 机组锅炉模型及实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 149-152.
- ZENG Deliang, ZHAO Zheng, CHEN Yanqiao, et al. A practical 500 MW boiler dynamic model analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 149-152.
- [17] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 75-79.
- ZENG Deliang, LIU Jizhen. Drum boiler dynamic model and load/pressure increment predict model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 75-79.
- [18] 宋新立, 刘肇旭, 李永庄, 等. 电力系统稳定计算中火电厂调速系统模型及其使用方法的分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 44-49.
- SONG Xinli, LIU Zhaoxu, LI Yongzhuang, et al. Analysis on speed governing system model for fossil-fuel generating plant and its application in power system stability simulation[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 44-49.
- [19] 刘辉, 田云峰, 吴涛. 考虑机组协调控制的汽轮机调速器模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 103-107.
- LIU Hui, TIAN Yunfeng, WU Tao. A new turbine governor model including unit plant coordinated control system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 103-107.
- [20] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型—电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.
- TANG Yong, SONG Xinli, LIU Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation, part (III): long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25.
- [22] PEREIRA L, KOSTEREV D, DAVIES D, et al. New thermal governor model selection and validation in the WECC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 517-523.
- [23] RIMOROV D, KAMWA I, JOÓS G. Quasi-steady-state approach for analysis of frequency oscillations and damping controller design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3212-3220.
- [24] 胡德文. 非线性与多变量系统相关辨识[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.

收稿日期: 2019-04-27; 修回日期: 2019-09-01

作者简介:

颜自坚(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度自动化; E-mail: yanzijian@epri.sgcc.com.cn

刘俊(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网分析与仿真; E-mail: liu-jun2@epri.sgcc.com.cn

周海强(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: js.hq@163.com

(编辑 周金梅)